

Pengaruh Proses *Rolling* terhadap Respons *Stiffened Plate* Baja Karbon Rendah menggunakan Metode Elemen Hingga

Putri Permata Irawan¹, Ir. Hendra Saputra, S.T., M.Eng., and Nurul Laili Arifin, S.ST., M.T.

Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: putri.4412211010@students.polibatam.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh proses *rolling*, yaitu *hot rolling* (HR) dan *cold rolling* (CR), terhadap respons struktur *stiffened plate* baja karbon rendah menggunakan metode elemen hingga. Material yang digunakan adalah baja karbon rendah ASTM A36. Data sifat mekanik diperoleh dari jurnal eksperimen yang melaporkan hasil uji tarik baja A36 untuk kondisi *hot rolling* pada 950 °C dan *cold rolling* pada 20 °C, termasuk nilai *yield strength* dan modulus elastisitas. Analisis numerik dilakukan menggunakan Ansys dengan model struktur berupa *stiffened plate* bertipe *flat bar* yang merepresentasikan panel lambung kapal. Beban yang diterapkan berupa tekanan statik merata pada permukaan pelat dengan tiga level tekanan, yaitu 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa, yang dikaitkan dengan variasi kedalaman air laut berdasarkan persamaan tekanan hidrostatik. Parameter respons struktur yang dianalisis meliputi tegangan ekuivalen von Mises, deformasi total, dan regangan maksimum pada panel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan tekanan menyebabkan kenaikan deformasi, tegangan, dan regangan secara hampir linier pada kedua material. Pada tekanan 150 kPa diperoleh deformasi maksimum sebesar 2,79 mm untuk *hot rolled* dan 3,23 mm untuk *cold rolled*. Tegangan maksimum kedua material relatif sama, yaitu 75,5 MPa, dan masih jauh di bawah nilai *yield stress* material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan modulus elastisitas akibat proses *rolling* memengaruhi kekakuan struktur, sedangkan seluruh respons struktur masih berada pada daerah elastis.

Kata kunci: Baja karbon rendah, *Hot rolling*, *Cold rolling*, *Stiffened plate*, Metode elemen hingga

Abstract

This study investigates how rolling processes, namely hot rolling (HR) and cold rolling (CR), affect the structural response of low-carbon steel stiffened plates using the finite element method. The material considered is ASTM A36 low-carbon steel. Mechanical properties are taken from experimental tensile tests on A36 steel rolled at 950 °C for hot rolling and 20 °C for cold rolling, including yield Strength and young's modulus. The numerical analysis is carried out in Ansys using a flat-bar stiffened plate model that represents a typical ship hull panel. The applied loading consists of uniform static pressures of 50 kPa, 100 kPa, and 150 kPa on the plate surface, which are related to seawater depths through the hydrostatic pressure equation. The structural response is evaluated in terms of von Mises stress, total deformation, and maximum strain on the panel. The simulation results show that increasing the pressure causes a nearly linear increase in deformation, stress, and strain for both materials. At a pressure of 150 kPa, the maximum deformation reached 2.79 mm for hot rolled and 3.23 mm for cold rolled. The maximum stress for both materials is relatively the same, at 75.5 MPa, and is still far below the material's yield stress. The study results indicate that differences in the elastic modulus due to the rolling process affect the stiffness of the structure, while the entire structural response still remains within the elastic region.

Keywords : Low-carbon steel, Hot rolling, Cold rolling, Stiffened plate, Finite element method

1. Pendahuluan

Struktur kapal dirancang untuk mampu menahan berbagai jenis beban yang bekerja selama masa operasinya. Salah satu beban yang selalu bekerja pada lambung kapal adalah tekanan hidrostatik air laut. Besarnya tekanan tersebut akan meningkat seiring bertambahnya kedalaman sehingga dapat memengaruhi respons struktur yang menerima beban tersebut. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat menjadi salah satu aspek penting dalam perancangan struktur kapal.

Baja karbon rendah merupakan material yang paling banyak digunakan pada konstruksi kapal karena memiliki kombinasi kekuatan, keuletan, kemampuan pengelasan, serta biaya produksi yang relatif ekonomis [1]. Selain dipengaruhi oleh komposisi kimia, sifat mekanik baja juga dapat berubah akibat proses manufaktur yang digunakan selama pembentukannya. Salah satu proses pembentukan yang umum digunakan pada industri baja adalah *rolling*.

Berdasarkan temperatur prosesnya, *rolling* dapat dibedakan menjadi *hot rolling* dan *cold rolling*. *Hot rolling* dilakukan pada temperatur tinggi sehingga memungkinkan terjadinya proses rekristalisasi selama deformasi berlangsung dan umumnya menghasilkan material yang lebih ulet. Sebaliknya, *cold rolling* dilakukan pada temperatur ruang dan berkaitan erat dengan fenomena *strain hardening*, di mana peningkatan deformasi plastis menyebabkan peningkatan densitas dislokasi dalam material sehingga meningkatkan kekuatan tetapi mengurangi keuletan. Fenomena ini terjadi secara bertahap melalui beberapa tahap pengerasan regangan yang berbeda selama proses deformasi [2], [3]

Penelitian yang dilakukan oleh Okokpujie dan Tartibu [2] menunjukkan bahwa baja karbon rendah ASTM A36 yang mengalami proses *hot rolling* dan *cold rolling* memiliki sifat mekanik yang berbeda. Material *hot rolled* memiliki modulus elastisitas sebesar 31,77 GPa dan *yield strength* sebesar 907,45 MPa, sedangkan material *cold rolled* memiliki modulus elastisitas sebesar 27,43 GPa dan *yield strength* sebesar 753,74 MPa. Perbedaan sifat mekanik tersebut diduga dapat

memengaruhi respons struktur ketika menerima pembebanan.

Dalam konstruksi kapal, pelat berpenegar atau *stiffened plate* merupakan salah satu elemen struktur yang banyak digunakan pada bagian lambung, geladak, maupun sekat kapal. Penambahan penegar pada pelat bertujuan untuk meningkatkan kekakuan dan kemampuan struktur dalam menahan beban tanpa meningkatkan berat struktur secara signifikan [4], [5]. Karena *stiffened plate* merupakan elemen dasar yang banyak digunakan pada struktur kapal, model ini dipilih sebagai representasi sederhana untuk mengevaluasi pengaruh variasi material terhadap respons struktur.

Di sisi lain, tekanan air laut yang bekerja pada panel lambung kapal bervariasi terhadap kedalaman dan dapat menggunakan persamaan tekanan hidrostatik $p = \rho gh$. Dengan mengaitkan tekanan yang diterapkan pada model *stiffened plate* dengan kedalaman ekuivalen di laut, analisis numerik dapat digunakan untuk membaca kecenderungan respons panel pada zona tekanan operasi yang berbeda. Hal ini membuka peluang untuk mengkaji pengaruh proses *rolling* terhadap respons *stiffened plate* baja karbon rendah di bawah beberapa level tekanan air laut, sehingga dapat diperoleh gambaran kecenderungan pemilihan proses pembentukan yang lebih sesuai untuk kondisi operasi tertentu. Penelitian ini dibatasi pada penggunaan model *stiffened plate* sebagai panel representatif dengan geometri yang dijaga konstan pada setiap variasi material dan beban. Beban yang diterapkan berupa tekanan statik merata ekuivalen tekanan air laut pada beberapa level kedalaman, tanpa memasukkan efek pembebanan dinamis secara rinci. Analisis numerik dilakukan menggunakan *software* Ansys *Student Version*, sehingga terdapat keterbatasan pada fitur dan kapasitas analisis yang dapat digunakan. Hasil penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai representasi lengkap perilaku seluruh kapal, melainkan sebagai studi panel representatif yang dapat mendukung pertimbangan pemilihan proses *rolling* pada struktur kapal.

Berdasarkan latar belakang dan batasan penelitian

tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh proses *hot rolling* dan *cold rolling* terhadap respons struktur *stiffened plate* baja karbon rendah ASTM A36 menggunakan metode elemen hingga. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai deformasi total, tegangan ekuivalen von Mises, dan regangan maksimum pada tiga variasi tekanan statik, yaitu 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa, sehingga dapat diketahui pengaruh perbedaan sifat mekanik hasil proses *rolling* terhadap kekakuan dan respons struktur.

2 Metodologi Penelitian

2.1 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga (*Finite Element Method* atau FEM) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan mekanika dengan cara membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik-titik tertentu yang disebut *nodal*. Setiap elemen kemudian dianalisis menggunakan pendekatan persamaan diferensial yang diubah menjadi bentuk persamaan aljabar, sehingga respon keseluruhan struktur dapat diperoleh melalui proses perakitan (*assembly*) dan penyelesaian sistem persamaan tersebut.

Pada metode ini, struktur tidak lagi dianggap sebagai satu kesatuan kontinu, tetapi sebagai gabungan elemen-elemen sederhana yang lebih mudah dianalisis. Dengan pendekatan ini, permasalahan dengan geometri yang cukup kompleks tetap dapat diselesaikan, terutama jika dibandingkan dengan metode analitik yang umumnya hanya berlaku untuk bentuk yang sederhana.

Dalam penelitian ini, metode elemen hingga digunakan dengan bantuan *software* Ansys untuk menganalisis respons struktur *stiffened plate* baja karbon rendah. Melalui metode ini, distribusi tegangan, deformasi, dan regangan pada struktur dapat diamati secara lebih detail sesuai dengan kondisi pembebanan dan batas yang diberikan.

2.2 Data Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah

baja karbon rendah ASTM A36. Data sifat mekanik material diperoleh dari penelitian yang membandingkan karakteristik baja A36 hasil proses *hot rolling* dan *cold rolling* dengan komposisi kimia yang mengacu pada baja struktural umum sebagaimana digunakan dalam penelitian Okokpujie dan Tartibu (2024) yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1
Komposisi unsur baja karbon rendah ASTM A36

Unsur	Berat (%)
Karbon (C)	0.26
Mangan (Mn)	0.75
Tembaga (Cu)	0.2
Fosfor (P)	0.04
Sulfur (S)	0.05
Besi (Fe)	99

Parameter utama pada penelitian ini menggunakan nilai modulus elastisitas dan *yield strength* yang dilaporkan pada penelitian Okokpujie & Tartibu [2]. Sementara itu, nilai densitas dan *Poisson's ratio* menggunakan nilai referensi ASTM A36 yang umum digunakan pada analisis struktur baja [6]. Adapun parameter material yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2
Parameter material yang digunakan sebagai input simulasi

Parameter	Hot Rolled	Cold Rolled
<i>Yield Strength</i> (MPa)	907,45	753,74
<i>Young's Modulus</i> (GPa)	31,77	27,43
<i>Density</i> (kg/m ³)	7850	7850
<i>Poisson's Ratio</i>	0,26	0,26

Parameter material yang digunakan sebagai input pada simulasi Ansys terdiri atas *yield strength*, *Young's modulus*, densitas, dan *Poisson's ratio*. Nilai *yield strength* dan *Young's modulus* diambil dari hasil pengujian eksperimental Okokpujie dan Tartibu [2], sedangkan densitas dan *Poisson's ratio* mengacu pada

data referensi material standar ASTM A36 [6].

Perbedaan nilai modulus elastisitas dan *yield strength* tersebut menjadi dasar untuk mengevaluasi pengaruh proses *rolling* terhadap respons struktur.

2.3 Model Geometri Stiffened Plate

Dalam penelitiannya, Okokpujie dan Tartibu [2] menggunakan spesimen tarik baja A36 berbentuk silinder dengan panjang pengamatan 28 mm dan diameter 4 mm untuk kondisi *hot rolling* dan *cold rolling*, sebagaimana diringkas pada Tabel 3.

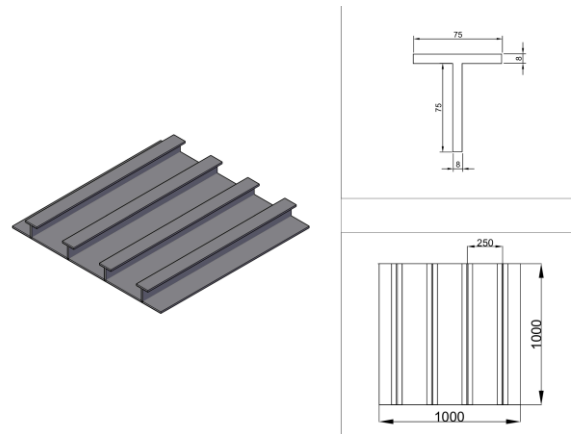
Tabel 3

Dimensi spesimen tarik baja untuk pengujian *Hot Rolling* dan *Cold Rolling*.

Kondisi Pengujian	Panjang (mm)	Diameter (mm)
<i>Hot Rolled</i>	28.00	4.00
<i>Cold Rolled</i>	28.00	4.00

Dengan dimensi spesimen yang sama untuk kondisi *hot rolling* dan *cold rolling*, nilai tegangan dan modulus elastisitas dari jurnal utama dapat langsung digunakan sebagai parameter material pada simulasi ini.

Pada penelitian ini, model *stiffened plate* dimodelkan sebagai panel representatif dengan dimensi yang lebih sederhana. Pelat utama memiliki panjang 1000 mm dan lebar 1000 mm dengan tebal pelat sebesar 8 mm. Pada pelat tersebut dipasang penegar memanjang dengan jarak antar penegar 250 mm, sehingga digunakan sebanyak empat buah penegar. Penegar yang digunakan pada penelitian ini adalah penegar tipe *flat bar*. Berdasarkan pemodelan geometri, *flat bar* memiliki lebar 80 mm, tinggi 75 mm, dan tebal 8 mm, dipasang secara tegak pada pelat utama.



Gambar 1. Model geometri stiffened plate

Seluruh dimensi geometri digunakan secara konsisten pada setiap variasi material yang dianalisis, dengan tujuan memastikan bahwa perbedaan respons struktur yang dihasilkan hanya dipengaruhi oleh perbedaan sifat mekanik material hasil proses *hot rolling* dan *cold rolling*, bukan oleh perubahan geometri struktur.

2.4 Pembebanan dan Kondisi Batas

Untuk merepresentasikan kondisi panel yang terhubung dengan struktur di sekitarnya, seluruh sisi panel diberikan kondisi batas berupa *fixed support*. Kondisi batas berupa *fixed support* menyebabkan seluruh perpindahan dan rotasi pada sisi-sisi panel menjadi nol. Akibatnya, respon struktur seperti deformasi dan tegangan cenderung terpusat pada bagian tengah pelat.

Beban eksternal dimodelkan sebagai tekanan statik merata yang bekerja pada permukaan pelat sebagai pendekatan terhadap tekanan air laut yang dialami panel lambung kapal. Tekanan air laut yang bekerja pada panel didekati dengan persamaan tekanan hidrostatik:

$$p = \rho gh$$

dengan:

p = tekanan hidrostatik (Pa)

ρ = densitas air laut (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

h = kedalaman (m)

Tekanan hidrostatik merupakan beban yang bekerja secara merata pada permukaan struktur dan meningkat secara linier terhadap kedalaman fluida. Dalam konteks struktur kapal, tekanan ini menghasilkan gaya terdistribusi pada pelat yang dapat menyebabkan deformasi serta tegangan pada struktur.

Dalam penelitian ini digunakan densitas air laut rata-rata sebesar 1025 kg/m^3 dan nilai $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, maka tekanan pada kedalaman sekitar 5 m, 10 m, dan 15 m berada pada kisaran 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa. Berdasarkan pendekatan tersebut, pada penelitian ini digunakan tiga level tekanan statik merata, yaitu 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa, sebagai representasi kondisi tekanan air laut pada zona kedalaman yang berbeda. Tekanan ini diberikan langsung sebagai *pressure load* pada permukaan pelat di Ansys, sehingga nilai tekanan menjadi parameter input utama dalam simulasi. Secara konseptual, tekanan merupakan gaya per satuan luas sehingga dapat dinyatakan melalui hubungan

$$p = \frac{F}{A},$$

dengan:

p = tekanan (Pa)

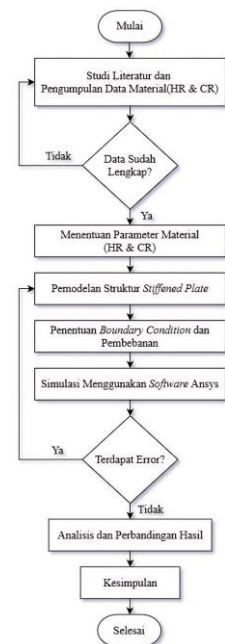
F = gaya total (N)

A = luas bidang yang menerima beban (m^2)

Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan beban terdistribusi dalam bentuk gaya ekuivalen, sehingga memudahkan analisis respon struktur terhadap beban eksternal yang bekerja [7]. Namun, pada penelitian ini hubungan tersebut hanya digunakan sebagai penjelasan dasar fisika pembebanan, sedangkan perhitungan numerik utama tetap mengacu pada nilai tekanan hasil persamaan hidrostatik.

2.5 Tahapan Simulasi

Tahapan simulasi numerik yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dirangkum dalam bentuk *flowchart* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart penelitian

Rangkaian tahapan pada Gambar 2. diterapkan secara konsisten untuk semua kombinasi material HR dan CR serta setiap level tekanan, sehingga hasil simulasi dapat dibandingkan secara langsung.

3 Analisa Data dan Pembahasan

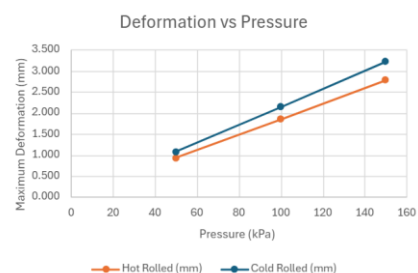
3.1 Deformasi Total

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan tekanan menyebabkan kenaikan deformasi pada kedua material. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4.

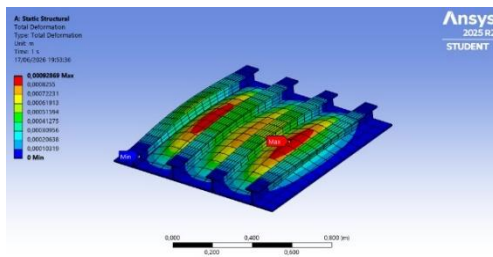
Tabel 4

Deformasi maksimum hasil simulasi.

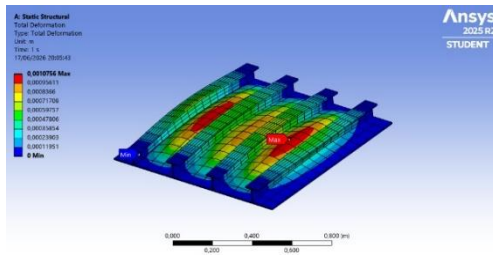
Tekanan (kPa)	Hot Rolled (mm)	Cold Rolled (mm)
50	0.929	1.076
100	1.857	2.151
150	2.786	3.227



Gambar 3. Grafik perbandingan deformasi HR dan CR



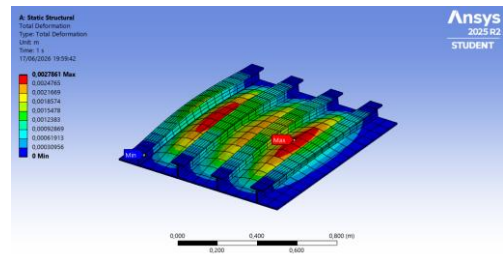
(a)



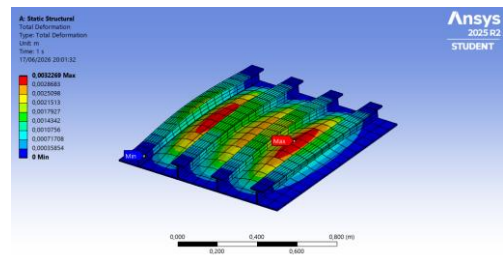
(b)

Gambar 4. Distribusi deformasi total pada tekanan 50 kPa (a) *Hot rolled* (b) *Cold rolled*

Pada tekanan 50 kPa, deformasi maksimum terlihat pada bagian tengah pelat, sedangkan bagian tepi hampir tidak mengalami perpindahan karena seluruh sisi pelat diberi *fixed support*. Pada kondisi ini, deformasi *cold rolled* lebih besar dibandingkan *hot rolled*.



(a)



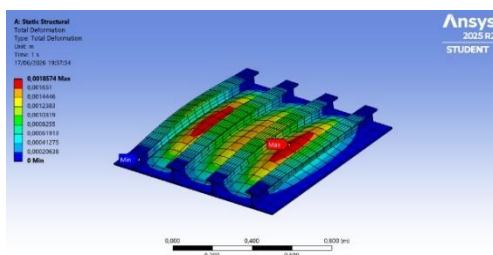
(b)

Gambar 6. Distribusi deformasi total pada tekanan 150 kPa (a) *Hot rolled* (b) *Cold rolled*

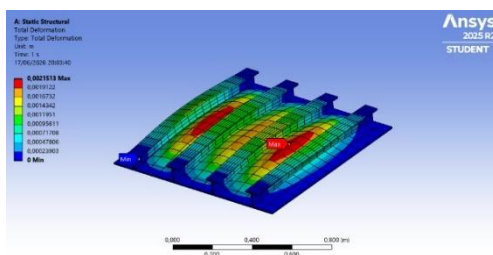
Pada tekanan 150 kPa, deformasi maksimum material *cold rolled* mencapai 3,23 mm, sedangkan material *hot rolled* hanya sebesar 2,79 mm. Selisih tersebut menunjukkan bahwa material *hot rolled* memiliki kekakuan struktur yang lebih tinggi dalam menahan pembebanan. Material dengan modulus elastisitas yang lebih tinggi memiliki kekakuan lebih besar sehingga menghasilkan deformasi yang lebih kecil sesuai dengan hubungan linear elastisitas Hooke's law dan definisi modulus elastisitas sebagai rasio tegangan terhadap regangan pada daerah elastis [8].

Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa material *cold rolled* menghasilkan deformasi yang lebih besar dibandingkan *hot rolled* pada seluruh variasi tekanan.

Kondisi ini sejalan dengan nilai modulus elastisitas material *hot rolled* yang lebih besar dibandingkan *cold rolled*. Modulus elastisitas menyatakan tingkat kekakuan material dan merupakan rasio antara tegangan dan regangan, sehingga material dengan nilai



(a)



(b)

Gambar 5. Distribusi deformasi total pada tekanan 100 kPa (a) *Hot rolled* (b) *Cold rolled*

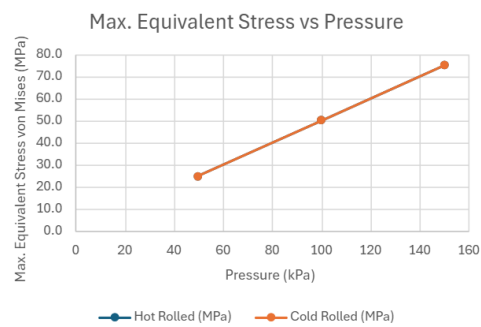
modulus yang lebih tinggi akan mengalami deformasi yang lebih kecil pada pembebanan yang sama [9].

3.2 Tegangan Ekuivalen von Mises

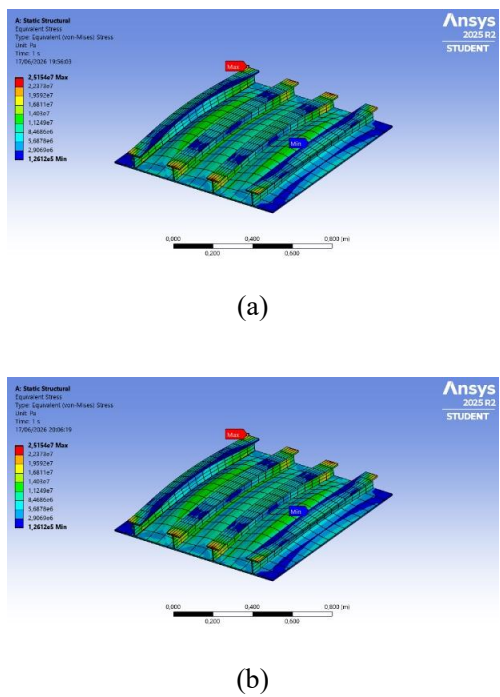
Nilai tegangan maksimum hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5
Tegangan maksimum hasil simulasi.

Tekanan (kPa)	Hot Rolled (MPa)	Cold Rolled (MPa)
50	25.2	25.2
100	50.3	50.3
150	75.5	75.5

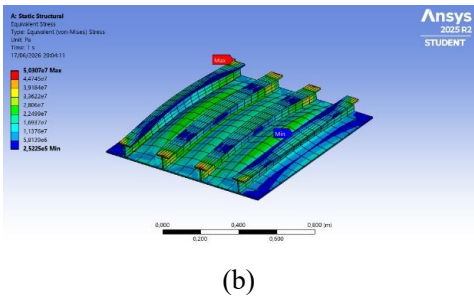
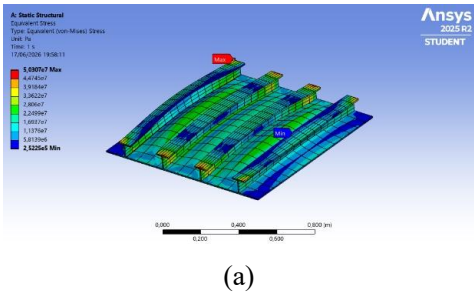


Gambar 7. Grafik perbandingan nilai tegangan HR dan CR



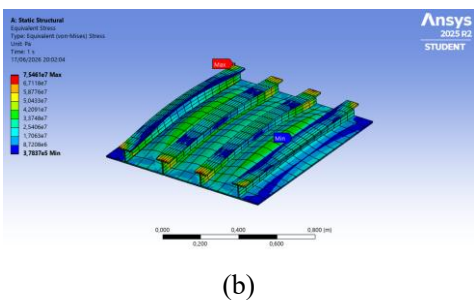
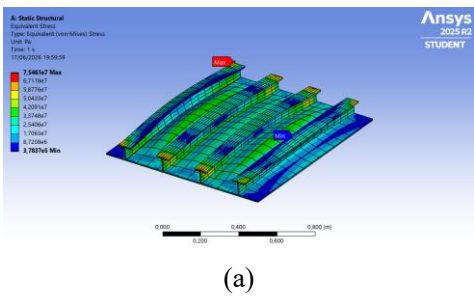
Gambar 8. Distribusi tegangan pada tekanan 50 kPa (a) Hot rolled (b) Cold rolled

Pada tekanan 50 kPa, tegangan maksimum mulai muncul pada daerah sambungan antara pelat dan penegar. Nilai tegangan pada kedua material masih sama karena geometri, kondisi batas, dan tekanan yang diberikan tidak berubah.



Gambar 9. Distribusi tegangan pada tekanan 100 kPa (a) Hot rolled (b) Cold rolled

Ketika tekanan dinaikkan menjadi 100 kPa, nilai tegangan ikut meningkat. Namun, pola distribusinya masih sama seperti pada tekanan 50 kPa.



Gambar 10. Distribusi tegangan pada tekanan 150 kPa (a) Hot rolled (b) Cold rolled

Dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimum pada kedua material hampir identik untuk setiap variasi tekanan. Pada analisis linear elastis dengan pembebanan berupa *pressure* dan kondisi batas yang sama, distribusi tegangan lebih banyak ditentukan oleh keseimbangan gaya eksternal dan geometri struktur. Perubahan modulus elastisitas lebih memengaruhi besarnya deformasi daripada distribusi tegangan.

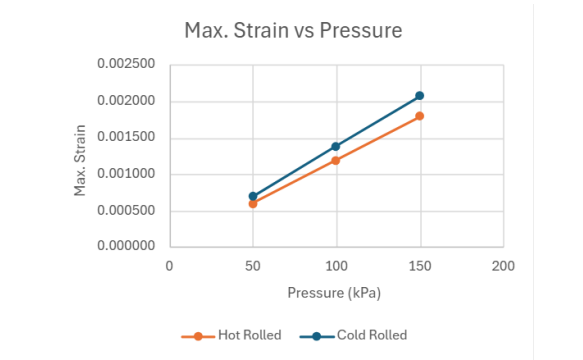
Selain itu, tegangan maksimum yang diperoleh masih jauh lebih rendah dibandingkan *yield strength* material. Pada kondisi pembebanan tertinggi, tegangan maksimum hanya mencapai 75,5 MPa, sedangkan *yield strength* material *hot rolled* dan *cold rolled* masing-masing sebesar 907,45 MPa dan 753,74 MPa. Dengan demikian, tidak terjadi *yielding* pada seluruh kondisi simulasi yang dianalisis.

3.3 Regangan Maksimum

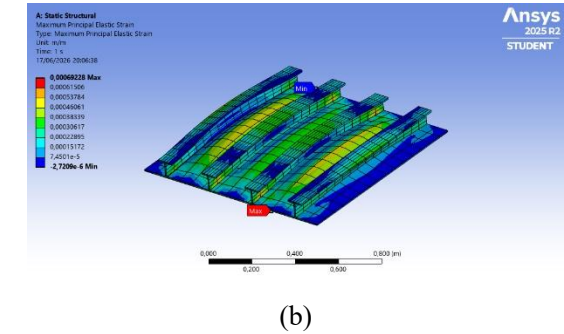
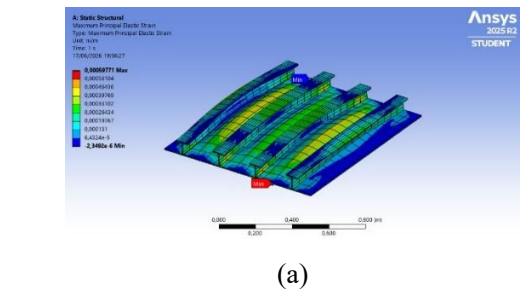
Nilai regangan maksimum yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6.
Regangan maksimum hasil simulasi

Tekanan (kPa)	Hot Rolled	Cold Rolled
50	0.000598	0.000692
100	0.001195	0.001385
150	0.001793	0.002077

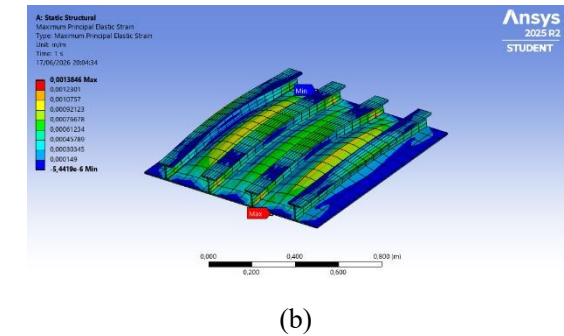
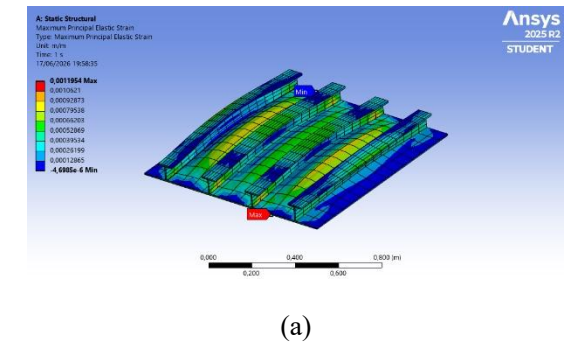


Gambar 11. Grafik perbandingan nilai regangan HR dan CR



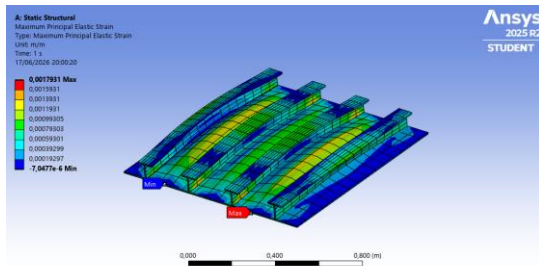
Gambar 12. Distribusi regangan maksimum pada tekanan 50 kPa (a) Hot rolled (b) Cold rolled

Pada tekanan 50 kPa, regangan maksimum terlihat pada bagian tengah pelat dan berkurang menuju sisi-sisi pelat yang diberi *fixed support*. Nilai regangan pada *cold rolled* lebih besar dibandingkan *hot rolled*, sejalan dengan deformasi yang dihasilkan pada kondisi pembebanan yang sama.

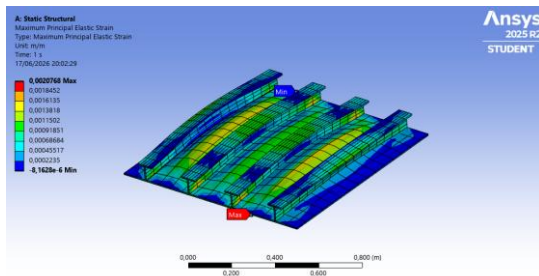


Gambar 13. Distribusi regangan maksimum pada tekanan 100 kPa (a) Hot rolled (b) Cold rolled

Ketika tekanan dinaikkan menjadi 100 kPa, nilai regangan maksimum ikut meningkat. Pola distribusi regangan masih sama seperti pada tekanan 50 kPa, dengan konsentrasi regangan terbesar berada di bagian tengah pelat.



(a)



(b)

Gambar 14. Distribusi regangan maksimum pada tekanan 150 kPa (a) Hot rolled (b) Cold rolled

Pada tekanan 150 kPa, regangan maksimum mencapai nilai tertinggi dari seluruh variasi tekanan yang dianalisis. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan menyebabkan regangan bertambah pada kedua material, dengan *cold rolled* tetap menghasilkan regangan yang lebih besar daripada *hot rolled*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa regangan meningkat seiring bertambahnya tekanan yang diberikan pada struktur.

Nilai regangan pada material *cold rolled* selalu lebih besar dibandingkan *hot rolled*. Hal ini konsisten dengan hasil deformasi yang telah diperoleh sebelumnya.

Secara teoritis, hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah elastis mengikuti hukum Hooke, di mana tegangan berbanding lurus dengan regangan melalui modulus elastisitas material [10]. Hubungan ini dinyatakan dalam bentuk persamaan $\sigma = E\varepsilon$, yang menunjukkan bahwa material dengan modulus elastisitas lebih tinggi akan mengalami regangan yang

lebih kecil untuk tegangan yang sama. Hal ini memperkuat hasil simulasi yang menunjukkan bahwa material *hot rolled* lebih kaku dibandingkan *cold rolled*.

Selain modulus elastisitas, sifat elastis material juga dipengaruhi oleh *Poisson's ratio*, yang menyatakan perbandingan antara regangan lateral dan regangan longitudinal. Ketika material mengalami tarikan, selain memanjang, material juga mengalami penyusutan pada arah tegak lurus [11].

3.4 Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa proses rolling memengaruhi respons struktur *stiffened plate* melalui perubahan sifat mekanik material, khususnya modulus elastisitas dan *yield strength*. Pada seluruh variasi tekanan, material *hot rolled* menghasilkan deformasi dan regangan yang lebih rendah dibandingkan *cold rolled*. Perbedaan tersebut disebabkan oleh nilai *Young's modulus* material *hot rolled* yang lebih tinggi, sehingga material memiliki kekakuan lebih besar dan mampu menahan deformasi elastis dengan lebih baik. Sementara itu, nilai tegangan ekuivalen von Mises yang diperoleh pada kedua material relatif sama karena distribusi tegangan lebih dipengaruhi oleh geometri struktur, kondisi batas, dan besar pembebanan daripada variasi modulus elastisitas material [10].

Pada tekanan maksimum sebesar 150 kPa, tegangan ekuivalen yang diperoleh hanya mencapai 75,5 MPa, sedangkan *yield strength* material *hot rolled* dan *cold rolled* masing-masing sebesar 907,45 MPa dan 753,74 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh hasil simulasi masih berada pada daerah elastis sehingga tidak terjadi *yielding* pada kedua material. Oleh karena itu, pendekatan material elastis linier yang digunakan pada penelitian ini masih mampu merepresentasikan respons struktur pada rentang pembebanan yang dianalisis.

Faktor lain yang dapat memengaruhi respons struktur, seperti tegangan sisa (*residual stress*) akibat proses

rolling, cacat manufaktur, pembebanan dinamis, maupun fenomena *buckling*, belum dimodelkan dalam penelitian ini. Dengan demikian, hasil yang diperoleh menggambarkan kecenderungan pengaruh proses *rolling* terhadap respons *stiffened plate* pada kondisi pembebanan statik, sehingga masih diperlukan penelitian lanjutan dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut untuk memperoleh representasi perilaku struktur yang lebih mendekati kondisi aktual.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa proses *hot rolling* dan *cold rolling* memberikan pengaruh terhadap respons struktur *stiffened plate* baja karbon rendah ASTM A36 melalui perbedaan sifat mekanik material. Peningkatan tekanan statik dari 50 kPa hingga 150 kPa menyebabkan deformasi, tegangan ekuivalen von Mises, dan regangan meningkat pada kedua material. Material *hot rolled* menghasilkan deformasi dan regangan yang lebih rendah dibandingkan *cold rolled* karena memiliki *Young's modulus* yang lebih tinggi, sehingga menunjukkan kekakuan struktur yang lebih baik. Sementara itu, nilai tegangan ekuivalen pada kedua material relatif sama karena lebih dipengaruhi oleh kondisi pembebanan dan geometri struktur. Seluruh nilai tegangan yang diperoleh masih berada di bawah *yield strength* masing-masing material, sehingga respons struktur tetap berada pada daerah elastis selama proses pembebanan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan sifat mekanik akibat proses *rolling* terutama memengaruhi kekakuan struktur, sedangkan pengaruhnya terhadap distribusi tegangan pada rentang pembebanan yang ditinjau relatif tidak signifikan.

5 Daftar Pustaka

- [1] M. Tekgoz and Y. Garbatov, "Collapse Strength of Intact Ship Structures," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 10, p. 1079, Oct. 2021, doi: 10.3390/jmse9101079.
- [2] I. P. Okokpujie and L. K. Tartibu, "Investigating the Effect of Hot and Cold Working on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon-Steel for Sustainable Manufacturing," *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 131, no. 1, pp. 87–104, Dec. 2024, doi: 10.37934/aram.131.1.87104.
- [3] R. G. Bruna, "Effects of hot and warm rolling on microstructure, texture and properties of low carbon steel," *Rem Rev. Esc. Minas*, vol. 64, no. 1, pp. 57–62, Mar. 2011, doi: 10.1590/S0370-44672011000100007.
- [4] D. K. Kim, S. Y. Yu, H. L. Lim, and N.-K. Cho, "Ultimate Compressive Strength of Stiffened Panel: An Empirical Formulation for Flat-Bar Type," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 8, p. 605, Aug. 2020, doi: 10.3390/jmse8080605.
- [5] J. K. Paik, B. J. Kim, and J. K. Seo, "Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels," *Ocean Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 271–280, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.007.
- [6] W. Material, "ASTM A36 Steel Properties, Modulus of Elasticity, Yield Strength, Material Density, Hardness & Equivalent," World Material. Accessed: Apr. 25, 2026. [Online]. Available: <https://www.theworldmaterial.com/astm-a36-steel/>
- [7] R. K. Mobley, "FORCES IN LIQUIDS," in *Fluid Power Dynamics*, Elsevier, 2000, pp. 8–24. doi: 10.1016/B978-075067174-3/50053-6.
- [8] A. Ragab Mahmoud, *Hooke's Law: Elasticity and Material Deformation*. 2025. doi: 10.13140/RG.2.2.23613.73443.
- [9] "Young's Modulus – EngineeringTechnology.org." Accessed: Jul. 11, 2026. [Online]. Available: <https://engineeringtechnology.org/engineering-materials/mechanical-properties-of-materials/strength/stress-strain-diagram/youngs-modulus/>
- [10] S. David Müzel, E. P. Bonhin, N. M. Guimarães,

and E. S. Guidi, “Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review,” *Polymers*, vol. 12, no. 4, p. 818, Apr. 2020, doi: 10.3390/polym12040818.

- [11] X. Li *et al.*, “Research progress of residual stress measurement methods,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e28348, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28348.